

Rec'd PCT/PTO 21  
PCT/EP 02/14710 #2

# BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND



REC'D 04 MAR 2003	
WIPO	PCT

## Prioritätsbescheinigung über die Einreichung einer Patentanmeldung

### PRIORITY DOCUMENT

SUBMITTED OR TRANSMITTED IN  
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)

**Aktenzeichen:** 102 01 995.9

**Anmeldetag:** 21. Januar 2002

**Anmelder/Inhaber:** Forschungszentrum  
Jülich GmbH, Jülich/DE

**Bezeichnung:** Verfahren zur Zuordnung eines Pulsverlaufes zu  
einem von einer Mehrzahl von Pulstypen  
verschiedener Abklingzeit und Vorrichtung zu dessen  
Durchführung (Pulsformdiskriminierung)

**IPC:** G 01 T 1/20

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 13. Februar 2003  
Deutsches Patent- und Markenamt  
Der Präsident  
Im Auftrag

HofB

Beschreibung:

Forschungszentrum Jülich GmbH, Wilhelm-Johnen-Str.,  
D-52425 Jülich

Verfahren zur Zuordnung eines Pulsverlaufes zu einem von  
einer Mehrzahl von Pulstypen verschiedener Abklingzeit  
und Vorrichtung zu dessen Durchführung  
(Pulsformdiskriminierung)

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Zuordnung eines Pulsverlaufes zu einem von einer Mehrzahl von Pulstypen verschiedener Abklingzeit, insbesondere eines Pulsverlaufes eines Szintillationsdetektors mit zumindest zwei Szintillationsmaterialien unterschiedlicher Abklingcharakteristik. Des weiteren betrifft die Erfindung eine Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens.

In der Nuklearmedizin werden radioaktiv markierte Substanzen zur in-vivo Messung physiologischer Prozesse verwendet. Eine empfindliche nuklearmedizinische Methode ist die Positronen-Emissions-Tomographie (PET). Dabei werden Isotope verwendet, die unter Aussendung eines Positrons zerfallen. Ein besonderer Reiz dieses Verfahrens besteht darin, daß einige der physiologisch interessantesten Elemente, wie Kohlenstoff, Stickstoff oder Sauerstoff kurzlebige radioaktive Isotope haben, die beim Zerfall ein Positron emittieren. Das ausgesandte Positron annihiliert im Gewebe innerhalb einer Strecke von 1-2 mm mit einem

Elektron und erzeugt zwei, in entgegengesetzte Richtungen ausgesandte Gammaquanten einer Energie von 511 keV. Die gleichzeitige Detektion der Gammaquanten in gegenüberliegenden Detektoren, die üblicherweise in einem Detektorring angeordnet sind, bildet die Grundlage für eine tomographische Bildrekonstruktion.

Jeder Detektor des Rings enthält einen Szintillationskristall, der beim Auftreffen eines Gammaquants einen Lichtblitz mit einer für das Szintillationsmaterial charakteristischen Abklingzeit aussendet. Beispielsweise weist das oft verwendete Wismutgermanat (BSO) eine Abklingzeit von 300 ns auf, was zusammen mit der relativ geringen Lichtausbeute die erreichbare Ortsauflösung beschränkt. Neuere Szintillationsmaterialien mit großem Potential für PET-Anwendungen umfassen Lutetium-Oxyorthosilikat (LSO) mit einer 8-fach höheren Lichtausbeute als BSO und einer Abklingzeit von 40 ns, und LuAP ( $\text{LuAlO}_3$ ) mit einer Abklingzeit von 17 ns. Die Lichtpulse der Szintillatorkristalle werden von einem Photodetektor, typischerweise einem Photovervielfacher oder einer Photodiode erfaßt, der zur Weiterverarbeitung geeignete elektrische Signale ausgibt.

Moderne Detektoren enthalten zur Steigerung der Ortsauflösung zwei oder mehr verschiedene Szintillationskristalle mit unterschiedlichen Abklingzeiten, die mit demselben Photodetektor gekoppelt sind. Durch eine Analyse der Ausgabesignale des Photodetektors kann aufgrund der verschiedenen Abklingzeiten bestimmt werden, welcher Detek-

torkristall angesprochen hat, und somit die Wechselwirkungstiefe (depth of interaction, DOI) im Detektor erfaßt werden.

Um diese Zuordnung der Photodetektor-Ausgabesignale zu einem der Szintillationskristalle durchzuführen, wird üblicherweise ein integrierender Verstärker beim Auslesen der Photodetektorsignale eingesetzt. Ein Vergleich der Anstiegszeit (definiert als die Zeit von 10% bis 90% des Maximalwerts) erlaubt dann eine Unterscheidung der verschiedenen Detektorpulse.

In einem anderen Ansatz wird für jedes Detektorsignal ein Startwert (Start des Pulses) und ein Stopwert (Ende des Pulses, bzw erster Nulldurchgang) erzeugt. Ein Zeit-zu-Amplituden-Wandler liefert dann ein Ausgangssignal mit einer Amplitude, die der Zeitdauer zwischen dem Start- und Stopwert proportional ist, und das zur Diskriminierung der Detektorpulse verwendet werden kann.

Allen genannten Unterscheidungs- und Zuordnungsverfahren ist gemein, daß sie eine niedrige Zuverlässigkeit bei verrauschten Signalen aufweisen und eine hohe Abtastrate für die zuzuordnenden Signalpulse erfordern.

Der Erfindung, liegt daher die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren der eingangs genannten Art anzugeben, das eine im Hinblick auf Abtastrate effiziente und zuverlässige Zuordnung eines Pulsverlaufs zu einem von einer Mehrzahl von Pulstypen verschiedener Abklingzeit ermöglicht.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß durch ein Verfahren zur Zuordnung eines Pulsverlaufes zu einem von einer Mehrzahl von Pulstypen verschiedener Abklingzeit, insbesondere eines Pulsverlaufes eines Szintillationsdetektors mit zumindest zwei Szintillationsmaterialien unterschiedlicher Abklingcharakteristik gelöst, das die Verfahrensschritte umfaßt:

- Aufnehmen eines Ausgangspulsverlaufes und Wandeln des Pulsverlaufes in ein elektrisches Signal, dessen Amplituden-Zeit-Verlauf den Pulsverlauf des Ausgangspulses repräsentiert;
- Transformieren des Amplituden-Zeit-Verlaufs in den Frequenzraum um einen den Ausgangspuls repräsentierenden Amplituden-Frequenz-Verlauf zu erhalten;
- Normieren des Amplituden-Frequenz-Verlaufs um einen normierten Amplituden-Frequenz-Verlauf zu erhalten;
- Vergleichen des normierten Amplituden-Frequenz-Verlaufs mit einem vorbestimmten Referenzverlauf; und
- Zuordnen des Ausgangspulsverlaufs zu einem der Pulstypen auf Grundlage des Ergebnisses des Vergleichs.

Die Erfindung beruht damit auf dem Gedanken, die Zuordnung zu einem der Pulstypen nicht im Zeitraum, sondern im

Frequenzraum durchzuführen. Dazu werden die gemessenen Pulsverläufe nach ihrer Transformation normiert und mit einem Referenzverlauf verglichen, der gleichsam einen Grenzverlauf zwischen zwei verschiedenen Pulstypen darstellt. Aus dem Ergebnis dieses Vergleichs kann dann der gemessene Pulsverlauf einem der Pulstypen zugeordnet werden. Dabei erfordert ein Unterscheidung zwischen zwei Pulstypen in der Regel einen Vergleich. Wird eine Zuordnung zu einem von mehr als zwei Pulstypen vorgenommen, können auch mehrerer Vergleiche mit mehr als einem Referenzverlauf erforderlich sein.

Die Ausführung des Vergleichs im Frequenzraum kann bei höherer Zuverlässigkeit wesentlich effektiver (geringere Abtastrate) erfolgen als im Zeitraum. Zugleich stehen effiziente Algorithmen zur Verfügung um den Zeitverlauf des gemessenen Pulses in den Frequenzraum zu transformieren.

In einer bevorzugten Ausgestaltung des Verfahrens wird das elektrische Signal vor der Transformation in den Frequenzraum einer Analog/Digital-Wandlung mit einer vorbestimmten Abtastrate unterzogen, um einen den Ausgangspuls repräsentierenden, diskreten Amplituden-Zeit-Verlauf zu erhalten.

Zweckmäßig wird bei dem erfindungsgemäßen Verfahren bei dem Schritt des Transformierens der diskrete Amplituden-Zeit-Verlauf einer diskreten Fouriertransformation (DFT) unterzogen, um einen diskreten Amplituden-Frequenz-Verlauf zu erhalten. Insbesondere kann die diskrete Fou-

riertransformation mit einer schnellen Fouriertransformation (FFT) berechnet werden.

Bei dem Schritt des Normierens wird vorteilhafterweise der Amplituden-Frequenz-Verlauf auf die Amplitude bei der Frequenz Null bezogen, insbesondere wird der Amplituden-Frequenz-Verlauf zweckmäßig durch die Amplitude bei der Frequenz Null geteilt.

In einer bevorzugten Weiterbildung des erfindungsgemäßen Verfahrens wird bei dem Schritt des Vergleichens der Differenz-Verlauf des normierten Amplituden-Frequenz-Verlaufs und des Referenzverlaufs gebildet, der Differenz-Verlauf für jede Frequenz mit einem vorbestimmten Wichtungsfaktor multipliziert, und als Zuordnungsparameter die Summe dieser Produkte über alle Frequenzen berechnet.

Dabei kann die Zuordnung zu einem der Pulstypen auf Grundlage des Vorzeichens und/oder des Betrags des Zuordnungsparameters erfolgen. Insbesondere kann im Fall, wo der Ausgangspulsverlauf einem von zwei Pulstypen verschiedener Abklingzeit zugeordnet wird, die Zuordnung auf Grundlage nur des Vorzeichens des Zuordnungsparameters erfolgen. Dies gestattet eine besonders einfache Entscheidung über die Zuordnung eines gemessenen Pulses zu einer der Pulstypen.

Der Wichtungsfaktor ist in einer Ausgestaltung des Verfahrens derart gewählt, daß er ein Maximum bei kleinen

Frequenzen hat und zu großen Frequenzen hin abnimmt. Dies trägt der Beobachtung Rechnung, daß die niedrigeren Frequenzen stärker als höhere Frequenzen zur Diskriminierung der Pulstypen beitragen.

Dabei ist es im vorstehend erläuterten Zusammenhang bevorzugt, wenn die hochfrequenten Komponenten des elektrischen Signals vor der Transformation in den Frequenzraum durch ein Tiefpaßfilter unterdrückt werden. Hierdurch können störende Rückfaltungen von Signalen, deren Frequenz höher als die halbe Abtastrate liegt, bei der Digitalisierung (ADC) des Signals vermieden werden.

Das Verfahren kann in besonders vorteilhafter Weise dadurch weitergebildet sein, daß vor dem Aufnehmen zuzuordnender Pulsverläufe ein Referenzverlauf bestimmt wird durch

- Aufnehmen von Eichpulsverläufen mit bekannter Zuordnung zu zwei Pulstypen mit verschiedener Abklingzeit und Wandeln jeweils des Pulsverlaufes in ein elektrisches Signal, dessen Amplituden-Zeit-Verlauf den Pulsverlauf des Eichpulses repräsentiert;
- Transformieren jeweils des Amplituden-Zeit-Verlaufs in den Frequenzraum um einen den Eichpuls repräsentierenden Amplituden-Frequenz-Verlauf zu erhalten;



- Normieren des Amplituden-Frequenz-Verlaufs um einen normierten Amplituden-Frequenz-Verlauf zu erhalten; und
- Festlegen eines Referenzwertes für jede Frequenz derart, daß die Amplitudenwerte der Eichpulse des ersten Pulstyps für diese Frequenz im wesentlichen größer als der Referenzwert, und die Amplitudenwerte der Eichpulse des zweiten Pulstyps für diese Frequenz im wesentlichen kleiner als der Referenzwert sind.

Insbesondere kann der Referenzwert für jede Frequenz mit Vorteil dadurch festgelegt werden, daß jeweils ein Amplituden-Histogramm für die verschiedenen Pulstypen aufgestellt wird, der Schnittpunkt der Einhüllenden der Histogramme bestimmt wird, und der bestimmte Schnittpunkt als der Referenzwert festgelegt wird.

Als besonders vorteilhaft wird es im vorstehend erläuterten Zusammenhang angesehen, wenn vor dem Aufnehmen zuzuordnender Pulsverläufe der Wichtungsfaktor für jede Frequenz bestimmt wird durch

- Bestimmen des mittleren Betrags der Abweichung der Amplitudenwerte von dem Referenzwert für diese Frequenz für jeden der Pulstypen; und
- Festlegen einer hohen Wichtung für diese Frequenz bei einem großen mittleren Abweichungsbetrag und einer

niedrigen Wichtung für diese Frequenz bei einem niedrigen mittleren Abweichungsbetrag.

Eine erfindungsgemäße Vorrichtung zur Durchführung des beschriebenen Verfahrens umfaßt

- ein Mittel zum Aufnehmen eines Ausgangspulsverlaufes und einem Mittel zum Wandeln des Pulsverlaufes in ein elektrisches Signal, dessen Amplituden-Zeit-Verlauf den Pulsverlauf des Ausgangspulses repräsentiert;
- ein Mittel zum Transformieren des Amplituden-Zeit-Verlaufs in den Frequenzraum um einen den Ausgangspuls repräsentierenden Amplituden-Frequenz-Verlauf zu erhalten;
- ein Mittel zum Normieren des Amplituden-Frequenz-Verlaufs um einen normierten Amplituden-Frequenz-Verlauf zu erhalten;
- ein Mittel zum Vergleichen des normierten Amplituden-Frequenz-Verlaufs mit einem vorbestimmten Referenzverlauf;
- ein Mittel zum Zuordnen des Ausgangspulsverlaufs zu einem der Pulstypen auf Grundlage des Ergebnisses des Vergleichs und zur Ausgabe des Zuordnungsergebnisses;
- ein Mittel zum Bestimmen des Referenzverlaufes;

- ein Mittel zum Bestimmen der Wichtungsfaktoren.

Dabei können die Mittel grundsätzlich jeweils sowohl durch eine Hardwarekomponente, wie einen anwenderprogrammierbaren Logikschaltkreis (FPGA), durch Software in einem geeignet eingerichteten Rechner, oder durch Firmware gebildet sein. Ebenso können die Mittel in einem digitalen Signalprozessor (DSP) implementiert sein.

Weitere vorteilhafte Ausgestaltungen, Merkmale und Details der Erfindung ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen, der Beschreibung des Ausführungsbeispiels und den Zeichnungen.

Die Erfindung soll nachfolgend anhand eines Ausführungsbeispiels im Zusammenhang mit den Zeichnungen näher erläutert werden. Es sind jeweils nur die für das Verständnis der Erfindung wesentlichen Elemente dargestellt. Dabei zeigt

Figur 1 eine Blockdiagramm einer Vorrichtung zur Zuordnung eines gemessenen Pulsverlaufes nach einem Ausführungsbeispiel der Erfindung;

Figur 2 eine Auftragung von Amplituden-Zeit-Verläufen für je zwei Signalpulse von zwei verschiedenen Szintillationskristallen;

Figur 3 eine Auftragung der Amplituden-Frequenz-Verläufe der Signalpulse von Fig. 2;

Figur 4 eine Auftragung der normierten Amplituden-Frequenz-Verläufe der Signalpulse von Fig. 2 und eines Referenzverlaufs;

Figur 5 eine Auftragung der Differenz zwischen den normierten Amplituden-Frequenz-Verläufen und dem Referenzverlauf von Fig. 4;

Figur 6 ein Diagramm, das die Wichtungsfaktoren für die Frequenzkomponenten von Fig. 5 angibt;

Figur 7 eine Auftragung der gewichteten Differenzverläufe von Fig. 5; und

Figur 8 eine Auftragung des nach dem erfindungsgemäßen Verfahren bestimmten Zuordnungsparameters für 100 Ausgangspulse von zwei verschiedenen Szintillationskristallen.

Ein Beispiel einer Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens zur Zuordnung eines Pulsverlaufes zu zwei Pulstypen wird nachfolgend mit Bezug auf die Figuren 1 bis 8 im Detail beschreiben.

Der verwendete Szintillationsdetektor 10 enthält zwei verschiedene Szintillationskristall-Schichten 12 und 14, die hintereinander vor einem Photodetektor 16 angeordnet sind. Der Szintillationskristall 12 besteht im Ausführungsbeispiel aus LSO (Lutetium-Oxyorthosilikat) mit ei-

ner Abklingzeit von 40 ns, und der Szintillationskristall 14 aus LuYAP ( $\text{Lu}_{1-x}\text{Y}_x\text{AlO}_3$ ) mit einer Abklingzeit von 17 ns.

Zur Bestimmung des Referenzverlaufes und der Wichtungsfaktoren wurden zunächst Eichpulse mit bekannter Zuordnung zu dem schnellen LuYAP-Kristall oder dem langsameren LSO-Kristall aufgenommen. Die vom Photodetektor 16 gelieferten elektrischen Pulsverläufe der Eichpulse wurden mit einem Butterworth-Filter 22 zweiter Ordnung und einer Grenzfrequenz von 20 MHz tiefpaß-gefiltert. Dann wurden die Pulse mit einer Abtastrate  $f_s$  von 40 MHz, entsprechend dem doppelten der Grenzfrequenz des Tiefpaßfilters von dem A-D-Wandler 24 digitalisiert.

Das Ergebnis nach Tiefpaß-Filterung und Digitalisierung ist in Fig. 2 für jeweils zwei Pulse des LSO-Kristalls 12 (Bezugszeichen 42H, 42N) und des LuYAP-Kristalls 14 (Bezugszeichen 44H, 44N) gezeigt. Dabei ist zur besseren Illustration des Verfahrens jeweils ein Puls mit hoher Energie (LSO: 42H, LUYAP: 44H) und ein Puls mit niedriger Energie (LSO: 42N, LUYAP: 44N) ausgewählt und dargestellt.

Dann werden die Amplituden-Zeit-Verläufe der Zuordnungsvorrichtung 26 eingegeben, die in anwenderprogrammierbaren Logikschaltkreise 28, 30, 32, 34 und 36 umfaßt, deren Funktion aus der nachfolgenden Beschreibung deutlich wird.

Die Amplituden-Zeit-Verläufe der Eichpulse wurden zunächst mittels einer 32-Punkt-FFT fouriertransformiert (Bezugszeichen 28), wodurch bei der genannten Abtastrate eine Auflösung  $\Delta f$  von  $40 \text{ MHz}/32 = 1,25 \text{ MHz}$  erzielt wird.

Da sich die Pulsformen der beiden Detektoren vor allem im Bereich niedrigerer Frequenzen unterhalb von  $10 \text{ MHz}$  unterscheiden, würden auch bei einer niedrigeren Abtastrate von  $f_s = 20 \text{ MHz}$ , einem Tiefpaßfilter mit einer Grenzfrequenz von  $10 \text{ MHz}$  und einer 16-Punkt-FFT, bei derselben Auflösung  $\Delta f = 1,25 \text{ MHz}$ , gute Zuordnungsergebnisse erzielt werden. Wie weiter unten im Detail beschrieben, ergab der Rest mit der höheren Abtastrate eine sicherere Zuordnung der Pulse von 97% erfordert aber wegen der höheren Punktzahl der FFT höheren Aufwand für die Berechnung.

Das Ergebnis der 32-Punkt FFT für die vier Pulsverläufe von Fig. 2 ist in Fig. 3 dargestellt. Die  $i$ -te FFT-Komponente auf der horizontalen Achse entspricht dabei  $f_i = (i-1) \cdot 1,25 \text{ MHz}$ , die vertikale Achse gibt die Amplitude  $A(f_i)$  der Pulsverläufe bei der Frequenz  $f_i$  an. Wegen der Symmetrie der 32 FFT-Komponenten sind in der Fig. 3 nur die ersten 16 FFT-Komponenten gezeigt. Die Amplituden-Frequenz-Verläufe der vier Eichpulse sind durch Quadrate 52H (LSO, hohe Energie), Kreise 54H (LuYAP, hohe Energie), Sterne 52N (LSO, niedrige Energie) bzw. Kreuze 54N (LuYAP, niedrige Energie) dargestellt. Die unterschiedliche Gesamtenergie ist an den unterschiedlichen DC-Amplituden bei der Komponente  $i=1$  deutlich zu erkennen.

Zur Normierung wird der Amplituden-Frequenzverlauf jeden Pulses durch seine erste Frequenzkomponente  $A(f_1)$  geteilt (Bezugszeichen 30). Die resultierenden normierten Amplituden-Frequenz-Verläufe  $A_n(f_i)$  sind dann nicht mehr von der Energie der Pulse abhängig.

Fig. 4 zeigt die normierten Verläufe für LSO mit Bezugszeichen 62H und 62N, für LuYAP mit Bezugszeichen 64H und 64N. Wie aus der Fig. 4 deutlich zu erkennen, sind die Signale der verschiedenen Detektoren im Frequenzraum durch eine Lücke voneinander getrennt, die bei den niedrigeren Frequenzkomponenten  $f_2$  bis  $f_8$  besonders ausgeprägt ist. Ein Referenzverlauf 66, der in der Mitte der Lücke zwischen den beiden Pulstypen verläuft, ist ebenfalls in Fig. 4 dargestellt. Wie die Figur ebenfalls zeigt, kann mehr als eine Frequenzkomponente für die Unterscheidung der beiden Pulstypen verwendet werden.

Der Referenzverlauf 66 wurde für jede Frequenz  $f_i$  dadurch erhalten, daß die Amplitudenwerte für eine Reihe von Eichpulsen jeden Pulstyps in ein Amplituden-Histogramm eingetragen wurden. Der Schnittpunkt der Einhüllenden der jeweiligen Amplituden-Histogramme ergibt den Wert des Referenzverlaufs  $R(f_i)$  für diese Frequenz  $f_i$ .

Nun wurde die Differenz zwischen den normierten Amplituden-Frequenz-Verläufen  $A_n(f_i)$  und dem Referenzverlauf  $R(f_i)$  berechnet (Bezugszeichen 32). Das Ergebnis zeigt Fig. 5 für die LSO-Pulse als 72H und 72N, und für die Lu-

YAP-Pulse als 74H und 74N. Die Differenzwerte sind dabei für die LSO-Pulse größtenteils positiv, für die LuYAP-Pulse im wesentlichen negativ. Wie aus Fig. 5 ersichtlich, lassen sich die verschiedenen Pulse bei niedrigeren Frequenzkomponenten gut trennen, für höhere Frequenzkomponenten geht die Unterscheidungskraft jedoch gegen Null.

Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wurde für jede Frequenzkomponente ein Wichtungsfaktor  $W(f_i)$  festgelegt, der ein Maß für die Eignung dieser Frequenzkomponente zur Pulstypen-Diskriminierung darstellt. Dabei wird jeweils der mittlere Betrag der Abweichung der Amplitudenwerte von dem Referenzwert für jeden der Pulstypen als Maß für die Unterscheidungseignung genommen. Aus den in Fig. 5 dargestellten Amplituden lassen sich etwa die in Fig. 6 gezeigten Wichtungsfaktoren  $W(f_i)$  für jede Frequenzkomponente  $f_i$  bilden. Wie auch anschaulich aus Fig. 5 klar, erhalten dabei die Komponenten mit niedrigem Index, insbesondere die Frequenzkomponenten bei 2,5 MHz und 3,75 MHz, ein hohes Gewicht, während die Wichtungsfaktoren für die nicht zur Diskriminierung beitragenden höheren Frequenzen auf Null gesetzt sind.

Der so ermittelte Referenzverlauf  $R(f_i)$  und die Wichtungsfaktoren  $W(f_i)$  werden gespeichert, und können dann für die Zuordnung gemessener Pulsverläufe verwendet werden, deren Ursprung von einem der beiden Detektoren nicht bekannt ist, wie nachfolgend dargestellt.



Zur Illustration wird die Zuordnung anhand der bisher verwendeten Eichpulsen des LSO und des LuYAP Kristalls erläutert. Wird ein neuer Puls unbekannter Zuordnung gemessen, so werden die oben beschriebenen Schritte mit Ausnahme der Berechnung des Referenzverlaufs und der Wichtungsfaktoren durchgeführt.

Dann wird die Differenz zwischen dem normierten Amplituden-Frequenz-Verlauf  $A_N(f_i)$  und dem Referenzverlauf  $R(f_i)$  für jede Frequenz mit dem Wichtungsfaktor multipliziert

$$D_w(f_i) = W(f_i) * (A_N(f_i) - R(f_i))$$

um eine gewichtete Differenz  $D_w(f_i)$  zu erhalten (Bezugszeichen 34). Die so gewichteten Werteverläufe sind in der Fig. 7 für die LSO-Pulse als 82H bzw. 82N und für die LuYAP-Pulse als 84H und 84N dargestellt.

Ein Aufsummieren über die Beiträge von allen Frequenzen ergibt dann den Zuordnungsparameter  $Z$  für jeden Puls (Bezugszeichen 34). Zu Zuordnung genügt das Vorzeichen von  $Z$ . Ein positiver Wert von  $Z$  führt zu einer Einordnung des gemessenen Pulses als Signal des LSO-Kristalls, ein negativer Wert zu einer Einordnung als Signal des LuYAP-Kristalls (Bezugszeichen 36).

Zur Untersuchung der Zuverlässigkeit des erfindungsgemäßen Verfahrens wurden nach einmaliger Festlegung des Referenzverlaufs  $R(f_i)$  und der Wichtungsfaktoren  $W(f_i)$  einhundert Ausgangspulse, fünfzig des LSO-Kristalls und

fünfzig des LuYAP-Kristalls nach dem vorstehenden erläuterten Verfahren zugeordnet. Figur 8 zeigt jeweils den Zuordnungsparameter Z für die LSO-Pulse (Bezugszeichen 92) und die LuYAP-Pulse (Bezugszeichen 94). Die Z-Werte für die vier Eichpulse sind als 92H, 92N, 94H und 94N ebenfalls eingezeichnet. Wie aus der Figur ersichtlich, führt das erfindungsgemäße Verfahren bei 97% der Pulse zu einer korrekten Zuordnung.

Ansprüche:

Forschungszentrum Jülich GmbH, Wilhelm-Johnen-Str.,  
D-52425 Jülich

Verfahren zur Zuordnung eines Pulsverlaufes zu einem von  
einer Mehrzahl von Pulstypen verschiedener Abklingzeit  
und Vorrichtung zu dessen Durchführung (Pulsformdiskri-  
minierung)

1. Verfahren zur Zuordnung eines Pulsverlaufes zu einem von einer Mehrzahl von Pulstypen verschiedener Abklingzeit, insbesondere eines Pulsverlaufes eines Szintillationsdetektors mit zumindest zwei Szintillationsmaterialien unterschiedlicher Abklingcharakteristik, umfassend die Verfahrensschritte:
  - Aufnehmen eines Ausgangspulsverlaufes und Wandeln des Pulsverlaufes in ein elektrisches Signal, dessen Amplituden-Zeit-Verlauf den Pulsverlauf des Ausgangspulses repräsentiert;
  - Transformieren des Amplituden-Zeit-Verlaufs in den Frequenzraum um einen den Ausgangspuls repräsentierenden Amplituden-Frequenz-Verlauf zu erhalten;
  - Normieren des Amplituden-Frequenz-Verlaufs um einen normierten Amplituden-Frequenz-Verlauf zu erhalten;

- Vergleichen des normierten Amplituden-Frequenz-Verlaufs mit einem vorbestimmten Referenzverlauf;  
und
  - Zuordnen des Ausgangspulsverlaufs zu einem der Pulstypen auf Grundlage des Ergebnisses des Vergleichs.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das elektrische Signal vor der Transformation in den Frequenzraum einer Analog/Digital-Wandlung mit einer vorbestimmten Abtastrate unterzogen wird, um einen den Ausgangspuls repräsentierenden, diskreten Amplituden-Zeit-Verlauf zu erhalten.
  3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß bei dem Schritt des Transformierens der diskrete Amplituden-Zeit-Verlauf einer diskreten Fouriertransformation (DFT) unterzogen wird, um einen diskreten Amplituden-Frequenz-Verlauf zu erhalten.
  4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß die diskrete Fouriertransformation mit einer schnellen Fouriertransformation (FFT) berechnet wird.
  5. Verfahren nach einem der vorigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß bei dem Schritt des Normierens der Amplituden-Frequenz-Verlauf auf die Amplitude bei der Frequenz Null bezogen wird, insbesondere daß

der Amplituden-Frequenz-Verlauf durch die Amplitude bei der Frequenz Null geteilt wird.

6. Verfahren nach einem der vorigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß bei dem Schritt des Vergleichens der Differenz-Verlauf des normierten Amplituden-Frequenz-Verlaufs und des Referenzverlaufs gebildet wird, der Differenz-Verlauf für jede Frequenz mit einem vorbestimmten Wichtungsfaktor multipliziert wird, und als Zuordnungsparameter die Summe dieser Produkte über alle Frequenzen berechnet wird.
7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Zuordnung zu einem der Pulstypen auf Grundlage des Vorzeichens und/oder des Betrags des Zuordnungsparameters erfolgt.
8. Verfahren nach Anspruch 6 oder 7, dadurch gekennzeichnet, daß der Ausgangspulsverlauf zu einem von zwei Pulstypen verschiedener Abklingzeit zugeordnet wird, und die Zuordnung auf Grundlage nur des Vorzeichens des Zuordnungsparameters erfolgt.
9. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß der Wichtungsfaktor ein Maximum bei kleinen Frequenzen hat und zu großen Frequenzen hin abnimmt.
10. Verfahren nach einem der vorigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß hochfrequente Komponenten des

elektrischen Signals vor der Transformation in den Frequenzraum durch ein Tiefpaßfilter unterdrückt werden.

11. Verfahren nach einem der vorigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß vor dem Aufnehmen zuzuordnender Pulsverläufe ein Referenzverlauf bestimmt wird durch

- Aufnehmen von Eichpulsverläufen mit bekannter Zuordnung zu zwei Pulstypen mit verschiedener Abklingzeit und Wandeln jeweils des Pulsverlaufes in ein elektrisches Signal, dessen Amplituden-Zeit-Verlauf den Pulsverlauf des Eichpulses repräsentiert;
- Transformieren jeweils des Amplituden-Zeit-Verlaufs in den Frequenzraum um einen den Eichpuls repräsentierenden Amplituden-Frequenz-Verlauf zu erhalten;
- Normieren des Amplituden-Frequenz-Verlaufs um einen normierten Amplituden-Frequenz-Verlauf zu erhalten; und
- Festlegen eines Referenzwertes für jede Frequenz derart, daß die Amplitudenwerte der Eichpulse des ersten Pulstyps für diese Frequenz im wesentlichen größer als der Referenzwert, und die Amplitudenwerte der Eichpulse des zweiten Pulstyps für diese

Frequenz im wesentlichen kleiner als der Referenzwert sind.

12. Verfahren nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß der Referenzwert für jede Frequenz dadurch festgelegt wird, daß jeweils ein Amplituden-Histogramm für die verschiedenen Pulstypen aufgestellt wird, der Schnittpunkt der Einhüllenden der Histogramme bestimmt wird, und der bestimmte Schnittpunkt als der Referenzwert festgelegt wird.
13. Verfahren nach Anspruch 11 oder 12, dadurch gekennzeichnet, daß vor dem Aufnehmen zuzuordnender Pulsverläufe der Wichtungsfaktor für jede Frequenz bestimmt wird durch
  - Bestimmen des mittleren Betrags der Abweichung der Amplitudenwerte von dem Referenzwert für diese Frequenz für jeden der Pulstypen; und
  - Festlegen einer hohen Wichtung für diese Frequenz bei einem großen mittleren Abweichungsbetrag und einer niedrigen Wichtung für diese Frequenz bei einem niedrigen mittleren Abweichungsbetrag.
14. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 13, mit
  - einem Mittel zum Aufnehmen eines Ausgangspulsverlaufes und einem Mittel (10) zum Wandeln des Puls-

verlaufes in ein elektrisches Signal, dessen Amplituden-Zeit-Verlauf den Pulsverlauf des Ausgangspulses repräsentiert;

- einem Mittel (28) zum Transformieren des Amplituden-Zeit-Verlaufs in den Frequenzraum um einen den Ausgangspuls repräsentierenden Amplituden-Frequenz-Verlauf zu erhalten;
- einem Mittel (30) zum Normieren des Amplituden-Frequenz-Verlaufs um einen normierten Amplituden-Frequenz-Verlauf zu erhalten;
- einem Mittel (32,34) zum Vergleichen des normierten Amplituden-Frequenz-Verlaufs mit einem vorbestimmten Referenzverlauf; und
- einem Mittel (36) zum Zuordnen des Ausgangspulsverlaufs zu einem der Pulstypen auf Grundlage des Ergebnisses des Vergleichs und zur Ausgabe des Zuordnungsergebnisses.

15. Vorrichtung nach Anspruch 14, bei dem das Mittel (32,34) zum Vergleichen und das Mittel (36) zum Zuordnen durch einen anwenderprogrammierbaren Logikschaltkreis (FPGA) oder einen digitalen Signalprozessor (DSP) oder (PC) gebildet ist.



16. Vorrichtung nach Anspruch 15, bei dem das Mittel (28) zum Transformieren und das Mittel (30) zum Normieren durch einen anwenderprogrammierbaren Logikschaltkreis (FPGA) oder einen digitalen Signalprozessor (DSP) oder (PC) gebildet ist.

Zusammenfassung:

Forschungszentrum Jülich GmbH, Wilhelm-Johnen-Str.,  
D-52425 Jülich

Verfahren zur Zuordnung eines Pulsverlaufes zu einem von  
einer Mehrzahl von Pulstypen verschiedener Abklingzeit  
und Vorrichtung zu dessen Durchführung (Pulsformdiskri-  
minierung)

Ein Verfahren zur Zuordnung eines Pulsverlaufes zu einem von einer Mehrzahl von Pulstypen verschiedener Abklingzeit, insbesondere eines Pulsverlaufes eines Szintillationsdetektors mit zumindest zwei Szintillationsmaterialien unterschiedlicher Abklingcharakteristik, umfaßt die Verfahrensschritte:

- Aufnehmen eines Ausgangspulsverlaufes und Wandeln des Pulsverlaufes in ein elektrisches Signal, dessen Amplituden-Zeit-Verlauf den Pulsverlauf des Ausgangspulses repräsentiert;
- Transformieren des Amplituden-Zeit-Verlaufs in den Frequenzraum um einen den Ausgangspuls repräsentierenden Amplituden-Frequenz-Verlauf zu erhalten;
- Normieren des Amplituden-Frequenz-Verlaufs um einen normierten Amplituden-Frequenz-Verlauf zu erhalten;

- Vergleichen des normierten Amplituden-Frequenz-Verlaufs mit einem vorbestimmten Referenzverlauf;  
und
- Zuordnen des Ausgangspulsverlaufs zu einem der Pulstypen auf Grundlage des Ergebnisses des Vergleichs.

(Figur 1)

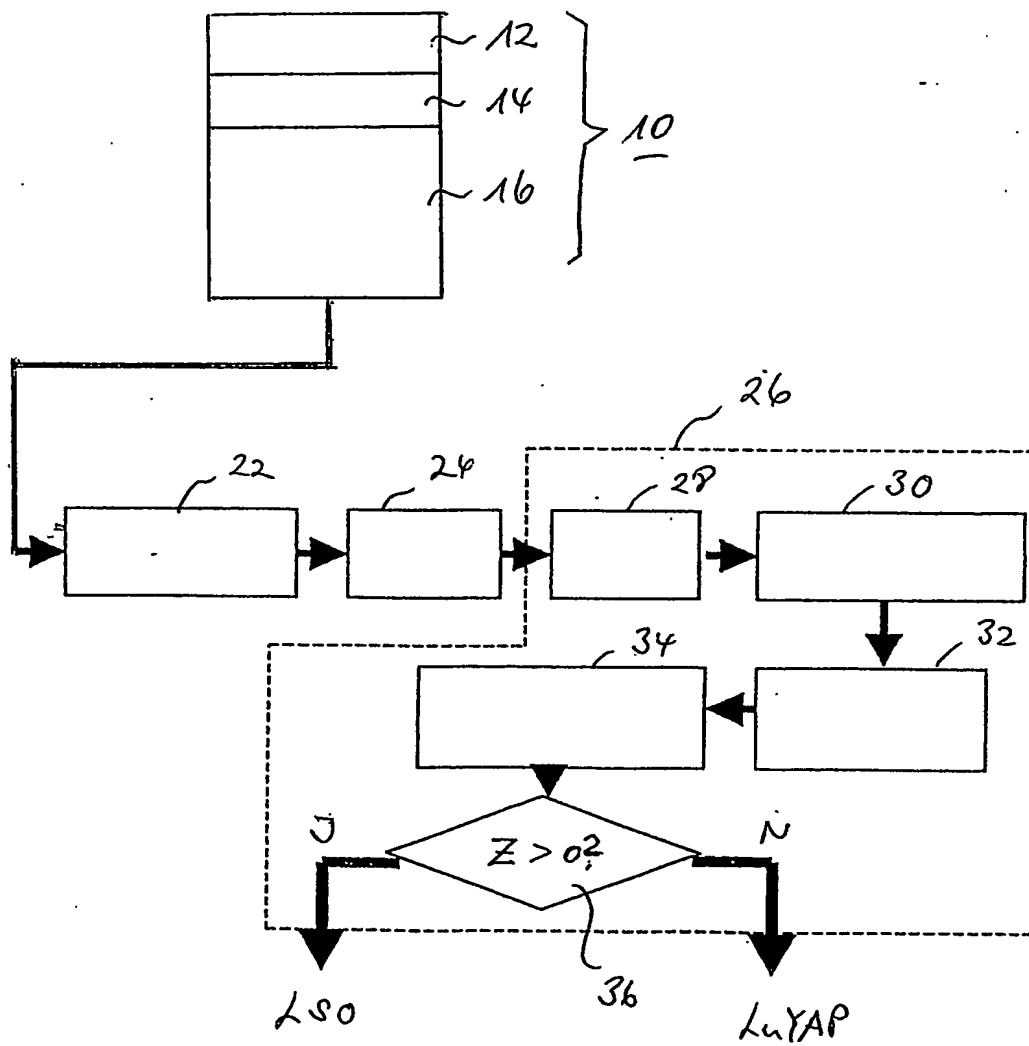


Fig. 1

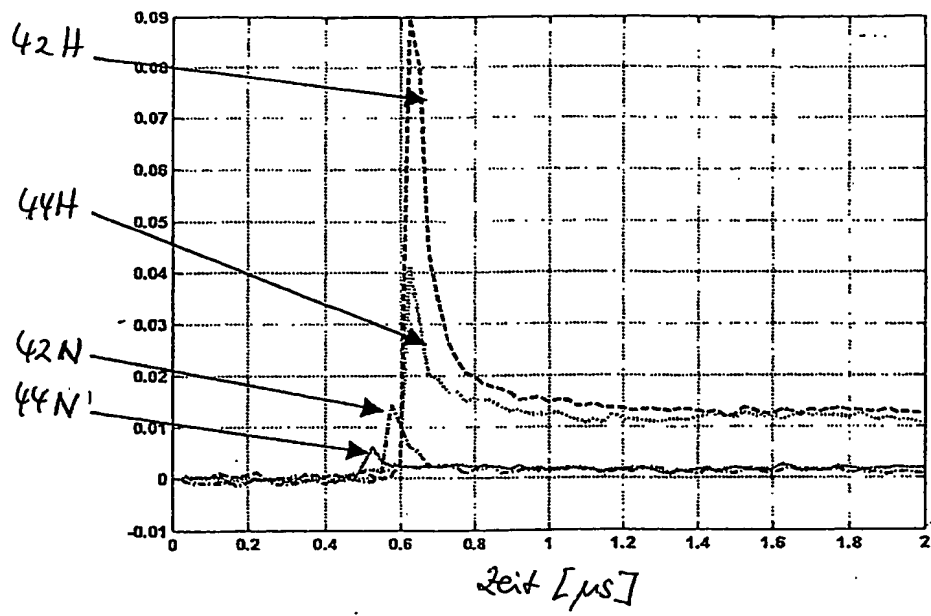


Fig. 2

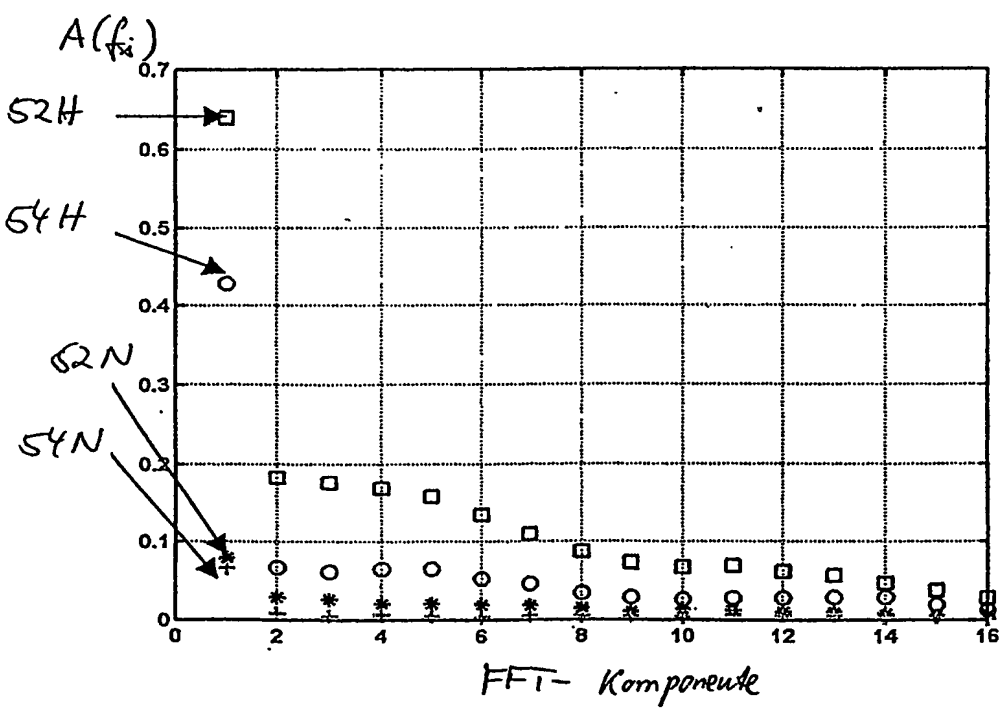


Fig. 3

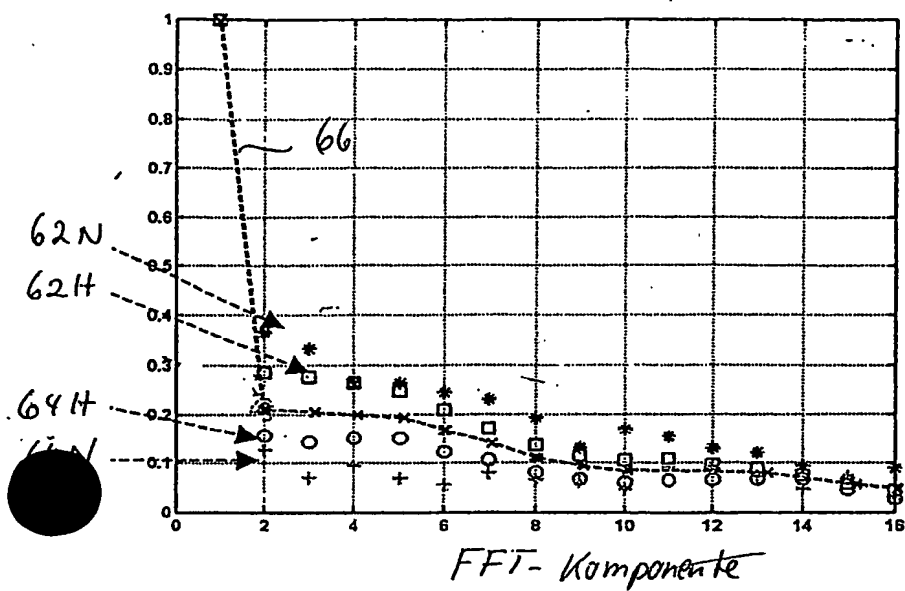
$A_N(f_i), R(f_i)$ 


Fig. 4

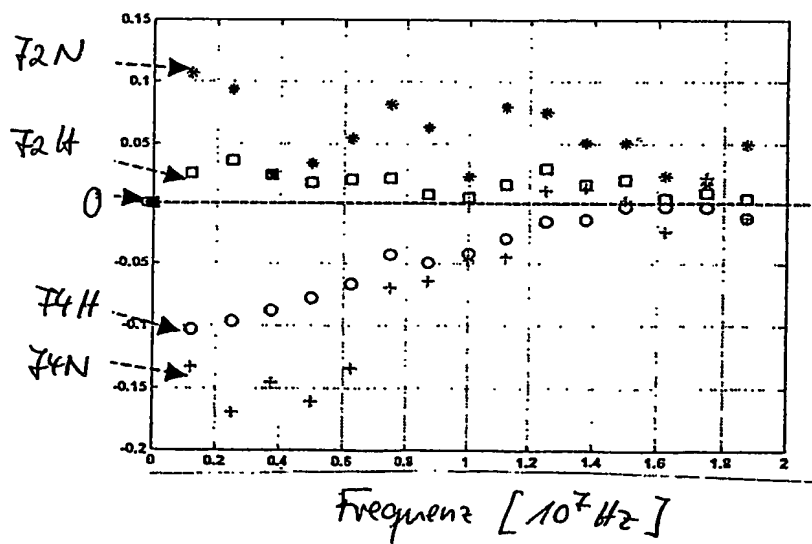
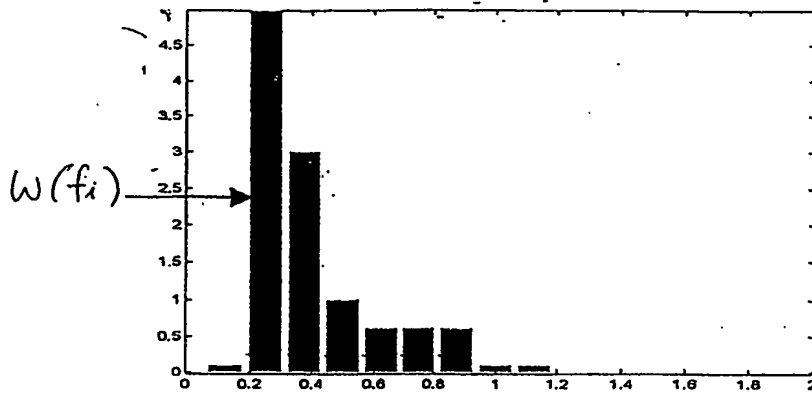


Fig. 5

415



Frequency  $[10^7 \text{ Hz}]$

Fig. 6

5/5

$D_w(f_i)$

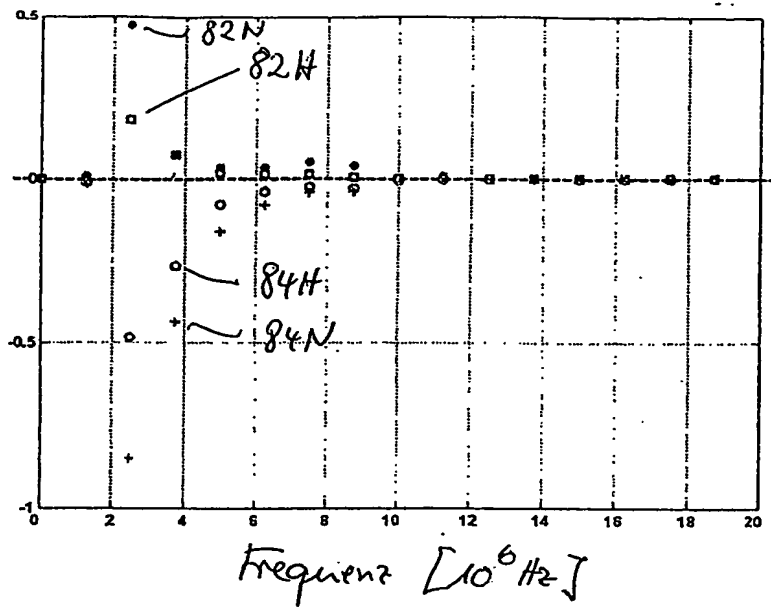


Fig. 7

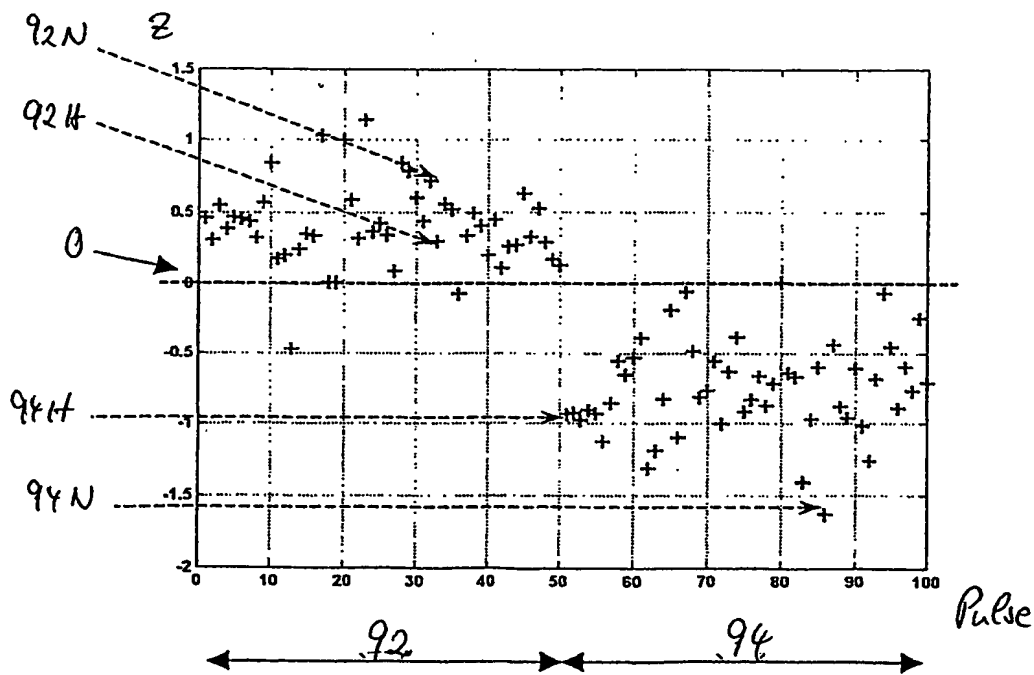


Fig. 8



**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☒ BLACK BORDERS
- ☒ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☒ FADED TEXT OR DRAWING
- ☒ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☒ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☒ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**